

Uticaj opterećenja na promene napona u stacionarnom stanju izazvane priključenjem kupaca-proizvođača na elektrodistributivnu mrežu

Doroteja Zarev, Milica Jevtić, Miloš Ječmenica, Nedžad Hadžiefendić, Jovan Trifunović

Katedra za energetske pretvarače i pogone
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

doroteja.zarev@etf.bg.ac.rs, m.jevtic@etf.bg.ac.rs, jecmenica@etf.bg.ac.rs, nedzad@etf.bg.ac.rs, jovan.trifunovic@etf.bg.ac.rs

Sažetak—U radu je prikazana detaljna analiza kriterijuma dozvoljenih vrednosti napona u stacionarnom režimu, koji predstavlja jedan od kriterijuma koje kupac-proizvođač treba da zadovolji kako bi se moglo izvršiti njegovo priključenje na elektrodistributivnu mrežu. Analizirani su zahtevi koje, u pogledu maksimalno dozvoljene vrednosti promene napona, propisuje Operator distributivnog sistema u Republici Srbiji kroz dokument „Pravila o radu distributivnog sistema“, sa jedne strane, kao i zahtevi koje propisuje nemački VDE standard, sa druge strane. Razmatrane su njihove sličnosti i razlike i dati su rezultati proračuna sprovedenih prema navedenim kriterijumima za priključenje tipičnih kupaca-proizvođača na elektrodistributivnu mrežu. Cilj sprovedene analize jeste dobijanje zaključaka koji će biti od značaja u nastavku istraživanja i koji će potencijalno doprineti poboljšanju i pojednostavljenju procedure obrade zahteva za priključenje kupaca-proizvođača na elektrodistributivnu mrežu.

Gljučne reči: kupac-proizvođač; promene napona u stacionarnom stanju; elektrodistributivna mreža; Pravila o radu distributivnog sistema; VDE standard

I. UVOD

Svaki objekat priključen na elektrodistributivni sistem (EDS), bilo da je proizvođač, potrošač, ili i jedno i drugo (npr. domaćinstva sa instaliranom fotonaponskom (PV od eng. *photovoltaic*) elektranom), ima uticaj na promenu naponskih prilika u elektrodistributivnoj mreži. U ovom radu je analiziran uticaj kupaca-proizvođača (eng. *prosumer*) na promene napona mreže u stacionarnom stanju, prema kriterijumu maksimalno dozvoljene promene napona u stacionarnom stanju. Navedeni kriterijum je propisan od strane Operatora distributivnog sistema u Republici Srbiji kroz dokument „Pravila o radu distributivnog sistema“ [1], sa jedne strane, kao i kroz nemački VDE standard [2] i [3], sa druge strane. Razmatrane su sličnosti i razlike u okviru procedura koje propisuju navedeni dokumenti, a posebna pažnja je posvećena parametrima koji se uzimaju u obzir pri proračunima. Ostali kriterijumi koje kupac-proizvođač treba da zadovolji da bi bio priključen na EDS, zajedno sa navedenim kriterijumom, prikazani su u [4]. Cilj analize predstavljene u ovom radu jeste donošenje zaključaka o tome

šta bi od navedenih zahteva bilo najbolje primenjivati u praksi, tako da stabilnost elektroenergetskog sistema, kao i kvalitet isporuke električne energije ne budu ugroženi, a da se istovremeno ne desi da pojedini zahtevi za priključenje kupaca-proizvođača na EDS budu potencijalno neopravdano odbijeni.

II. KRITERIJUM DOZVOLJENIH VREDNOSTI NAPONA U STACIONARNOM STANJU

Kriterijumom dozvoljenih vrednosti napona u stacionarnom stanju se proverava da li su, u okviru normalnog pogona, vrednosti napona u bilo kojoj tački EDS-a u dopuštenim granicama koje su definisane uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom. U nastavku je prikazan navedeni kriterijum propisan kroz [1]–[3].

A. Pravila o radu distributivnog sistema [1]

Za proveru kriterijuma maksimalno dozvoljene promene napona u stacionarnom stanju, potrebno je izvršiti proračune tokova snaga za minimalno i maksimalno opterećenje EDS-a.

Kod PV elektrana (koje za proizvodnju električne energije koriste energiju sunca), za minimalno i maksimalno opterećenje EDS-a, usvaja se minimalno i maksimalno opterećenje u periodu u kojem je moguća proizvodnja ove vrste elektrana (pri prisustvu sunčeve svetlosti).

Konkretno, zahteva se da napon na mestu priključenja (koji zavisi od snage generatora), pri uključenju generatora, ne uzimajući u obzir uticaj ostalih generatora u posmatranom delu mreže, ne promeni više od 2% za srednji napon i više od 3% za niski napon napajanja.

Kada se uzme u obzir uticaj svih elektrana koje su priključene na razmatrani deo EDS-a, zahteva se da promena napona u bilo kojoj tački EDS-a ne prelazi vrednost od 5% (za niski i srednji napon napajanja).

Ukoliko postoji više od jedne elektrane, ukupna vrednost promene napona se izračunava sumiranjem vrednosti izračunatih za svaku elektranu.

Za proveru kriterijuma dozvoljene vrednosti napona u stacionarnom stanju, mogu se koristiti sledeći izrazi:

$$\Delta u_m = \frac{S_E \cdot (R_k \cdot \cos |\varphi| - X_k \cdot \sin |\varphi|)}{U_n^2} \quad (1)$$

za režim u kojem elektrana troši reaktivnu snagu iz mreže (potpobuđeni režim), i

$$\Delta u_m = \frac{S_E \cdot (R_k \cdot \cos |\varphi| + X_k \cdot \sin |\varphi|)}{U_n^2} \quad (2)$$

za režim u kojem elektrana predaje reaktivnu snagu mreži (natpobuđeni režim), pri čemu je:

Δu_m – promena napona koju jedna elektrana izaziva u nekoj tački EDS-a, u [%]

S_E – prividna snaga elektrane u [MVA],

R_k – ekvivalentna otpornost distributivne mreže od tačke u kojoj se reguliše napon (kruta tačka, sa konstantnim naponom), do posmatrane tačke u [Ω],

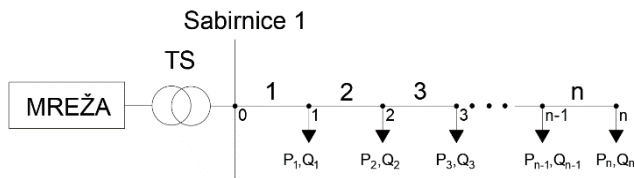
X_k – ekvivalentna reaktansa distributivne mreže od tačke u kojoj se reguliše napon (kruta tačka, sa konstantnim naponom), do posmatrane tačke u [Ω],

φ – fazni ugao napona i struje elektrane, u [$^\circ$], i

U_n – nazivni napon mreže u razmatranoj tački EDS-a, u [kV].

Prilikom proračuna tokova snaga i naponskih prilika, usvaja se da je $\cos\varphi = 0,95$, za režim u kojem elektrana injektira snagu u mrežu (natpobuđeni režim). Za minimalno opterećenje EDS-a može se usvojiti da elektrana radi sa $\cos\varphi = 1$.

Model za proračun promene napona uz uvažavanje opterećenja, koji Operator distributivne mreže u Republici Srbiji trenutno koristi pri obradi zahteva za priključenje kupaca-proizvođača na niskonaponsku mrežu, prikazan je na Sl. 1.



Slika 1. Model za proračun promene napona uz uvažavanje opterećenja

Kao što je prikazano na Sl. 1, potrošnja je modelovana aktivnom i reaktivnom snagom u čvorovima ($P_1, Q_1, \dots, P_n, Q_n$). Na slici je dato n čvorova u kome mogu biti priključeni potrošači ili proizvođači. Osim čvorova, na slici se vide i grane koje su takođe prikazane brojevima od 1 do n . U opštem slučaju, grana može biti neki vod, energetski transformator, kratka veza između dva čvora, i slično. Svaka grana ima svoje parametre, odnosno rezistansu i reaktansu, koje se uzimaju u obzir prilikom proračuna.

Uzima se da je napon na sabirnicama 1 sa Sl. 1 konstantan, odnosno da ima fiksnu vrednost (pri modelovanju se smatra da je mreža „beskonačne snage“, odnosno da je čvor 0 na sabirnicama 1 kruta tačka).

Model omogućava proračune napona u radijalnoj mreži sa otepcima u kojima postoji potrošnja/proizvodnja i može imati više naponskih nivoa.

Tokovi aktivne snage u granama zavise od odnosa proizvodnje i potrošnje u čvorovima.

Promena napona u određenoj tački n koja je posledica uticaja jedne elektrane može se dobiti na osnovu sledećih formula:

$$\Delta u_m = \frac{S_n \cdot (R_k \cdot \cos |\varphi| - X_k \cdot \sin |\varphi|)}{U_n^2} \quad (3)$$

za režim u kojem se u čvoru troši reaktivna snaga iz mreže (potpobuđeni režim), i

$$\Delta u_m = \frac{S_n \cdot (R_k \cdot \cos |\varphi| + X_k \cdot \sin |\varphi|)}{U_n^2} \quad (4)$$

za režim u kojem čvor predaje reaktivnu snagu mreži (natpobuđeni režim),

pri čemu sve veličine imaju isto značenje kao u (1) i (2). Jedina razlika je u tome što u ovom slučaju S_n može da predstavlja i potrošnju (odnosno razliku proizvodnje i potrošnje ukoliko u čvoru postoji i potrošnja i priključena elektrana), tako da će znak promene napona, osim od režima u kome se nalazi elektrana/potrošnja (sa aspekta faktora snage), zavisiti i od toga da li se u određenom čvoru snaga uzima iz mreže ili se injektira u nju. Injektiranje aktivne snage u mrežu (kada je u čvoru priključena elektrana ili postoji i elektrana i određena potrošnja, pri čemu je proizvodnja veća od potrošnje) doprinosi porastu napona (u odnosu na slučaj kada nema elektrane), dok uzimanje aktivne snage iz mreže (potrošnja ili ukoliko u istom čvoru postoji i elektrana i potrošnja, pri čemu je potrošnja veća od proizvodnje) doprinosi smanjenju napona u određenoj tački. Ukupna promena napona u nekoj tački se može dobiti algebarskim sumiranjem promena napona koje potiču od svake elektrane/potrošnje posebno.

Vrednosti R_k i X_k će se razlikovati u zavisnosti od pozicije tačke u mreži za koju se računa relativna promena napona.

B. VDE standard [2], [3]

Kada je u pitanju VDE standard, zahteva se da napon u tački priključenja kupca-proizvođača na mrežu ne pređe 3% za niski napon, odnosno 2% za srednji napon napajanja. Prilikom proračuna se u obzir mora uzeti i uticaj svih elektrana koje su priključene na razmatrani deo EDS-a, odnosno mora se uzeti u obzir uticaj svake elektrane, pa i one koja se priključuje, na promenu napona u tački priključenja nove elektrane.

Kriterijum se proverava na osnovu sledeće formule:

$$\Delta u_m = \frac{S_E \cdot (R_k \cdot \cos |\varphi| - X_k \cdot \sin |\varphi|)}{U_n^2} \quad (5)$$

pri čemu veličine koje figurišu u formuli imaju isto značenje kao u (1) i (2).

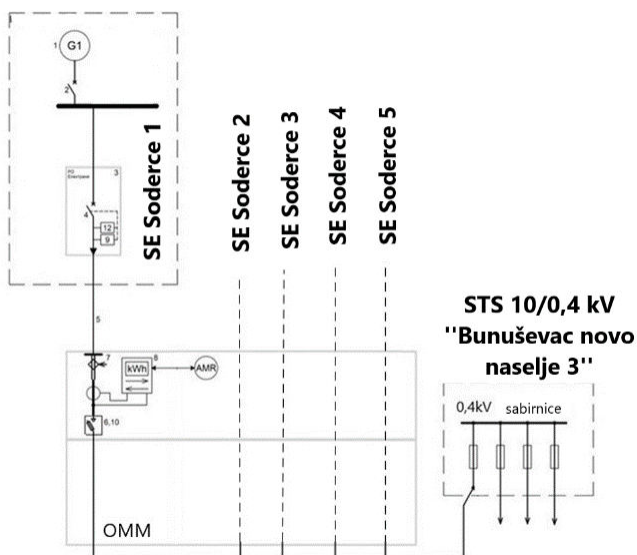
Pri proveru ovog kriterijuma se prema VDE standardu ne uzima u obzir opterećenje mreže, a proračuni se vrše za $\cos\varphi = 0,9$ induktivno.

III. PRIMER PRIKLJUČENJA PV ELEKTRANA NA ELEKTRODISTRIBUTIVNU MREŽU

U ovom odeljku su analizirani praktični primeri priključenja PV elektrana na elektrodistributivnu mrežu – prvi primer priključenja realne solarne (PV) elektrane je dobijen od „EPS Distribucija“ d.o.o. Beograd [5], dok drugi primer potiče iz VDE standarda [2]. Ispitivan je kriterijum maksimalno dozvoljene promene napona u stacionarnom stanju propisan prema [1]–[3] i prikazani su proračuni vršeni u okviru procedure koja je potrebna za utvrđivanje ispunjenosti navedenog kriterijuma. Dakle, proračuni u oba primera su izvršeni i prema [1] i prema [2] i [3].

A. Priključenje realne solarne elektrane (SE) Soderce 5 na elektrodistributivnu mrežu

U okviru ovog primera je prikazan uticaj priključenja elektrane SE Soderce 5 na promene napona u elektrodistributivnoj mreži u stacionarnom stanju, prema [1]–[3], na način koji je opisan u poglavlju II ovog rada (potpoglavlje A koji se odnosi na [1] i potpoglavlje B koji se odnosi na [2] i [3]). Nazivna snaga ove elektrane iznosi 30 kW. Pored te elektrane, priključuju se još 4 identične PV elektrane (SE Soderce 1–4), čiji će se uticaj uzeti u obzir u proračunima koji to zahtevaju. Priključenje PV elektrane Soderce 5 prikazano je na Sl. 2.



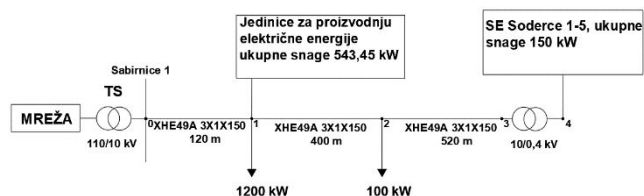
Slika 2. Priključenje SE Soderce 5 na mrežu [5]

Provera kriterijuma maksimalno dozvoljene promene napona u stacionarnom stanju, bez uvažavanja opterećenja, izvršena je na osnovu relacija (1) i (2).

Ekvivalentna otpornost distributivne mreže od tačke u kojoj se reguliše napon do posmatrane tačke iznosi $0,009 \Omega$, dok ekvivalentna reaktansa ima vrednost $0,312 \Omega$ [5]. Nominalni napon je 0,4 kV.

Proračun promene napona u tački priključenja elektrane SE Soderce 5, u stacionarnom stanju, bez uvažavanja opterećenja, urađen je za tri režima: $\cos\varphi = 1$, $\cos\varphi = 0,95$ induktivno i $\cos\varphi = 0,95$ kapacitivno.

Prilikom proračuna koji uvažavaju opterećenje u mreži, korišćen je model koji predstavlja deo mreže od interesa, odnosno deo mreže od tačke u kojoj se reguliše napon (TS 110/10 kV) do mesta u kojem se priključuje SE Soderce. Korišćen model, napravljen u skladu sa opštim modelom prikazanim na Sl. 1, kao i vrednosti potrošnje i proizvodnje u čvorovima za maksimalno opterećenje, dati su na Sl. 3. Pri minimalnom opterećenju, snaga potrošnje u čvoru 1 iznosi 550 kW, dok je snaga opterećenja u čvoru 2 jednaka 50 kW (prikazano strelicama na Sl. 3).



Slika 3. Model za proračun promene napona u tački priključenja SE Soderce pri maksimalnom opterećenju

Rezultati dobijeni u proračunima u kojima se razmatrao samo uticaj SE Soderce 5 na promene napona u priključnoj tački (bez uvažavanja opterećenja), kao i u proračunima gde je razmatran uticaj svih 5 elektrana (Soderce 1–5), prema [1]–[3], prikazani su u Tabeli I.

Proračuni pokazuju da je najveće odstupanje napona u tački priključenja u kapacitivnom režimu, pri $\cos\varphi = 0,95$ i iznosi 0,328 % ukoliko se razmatra samo uticaj SE Soderce 5 na promenu napona, odnosno 1,65% ukoliko se razmatra uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže.

Prema [2], kriterijum maksimalno dozvoljene promene napona u stacionarnom stanju, bez opterećenja, proverava se na osnovu relacije (5) i $\cos\varphi = 0,9$ induktivno. Dakle, vrednost promene napona na mestu priključenja SE Soderce 5, uz uvažavanje uticaja SE Soderce 1–4, kao i ostalih jedinica za proizvodnju električne energije ukupne snage 543,45 kW, prikazana je takođe u Tabeli I.

U Tabeli I su prikazani i rezultati proračuna koji uvažavaju opterećenje u mreži. Kada se uzme u obzir maksimalno opterećenje mreže, promena napona na mestu priključenja SE Soderce 5 iznosi 0,26%, kada je samo ona u pogonu (što je, prema [1], manje od dozvoljenih 3%, pa je kriterijum zadovoljen), dok je promena napona na mestu priključenja SE Soderce 5, kada su sve elektrane u razmatranom delu mreže u pogonu, jednaka 0,86% (promena napona je manja od 5% kada se uzme u obzir uticaj svih elektrana u razmatranom delu mreže, pa je prema [1] i ovaj zahtev zadovoljen). Na prvi pogled se očekuje da, kada su sve elektrane u pogonu, veći porast napona bude u slučaju minimalnog opterećenja, što se i dešava u većini slučajeva. Međutim, nekada se (kao u ovom primeru) može dogoditi da porast napona bude maksimalan u slučaju maksimalnog opterećenja (takođe sa elektranama u pogonu). Porast napona u mreži zavisi od odnosa proizvodnje i potrošnje, jačine mreže, ali i od režima rada PV elektrane. Ovakva pojava je posledica činjenice da se u proračunima sa maksimalnim opterećenjem uzima da elektrana radi u kapacitivnom režimu, sa $\cos\varphi = 0,95$, dok se u proračunima za slučaj minimalnog opterećenja uzima da elektrana radi sa $\cos\varphi = 1$.

Može se konstatovati da je posmatrana elektrana i prema [2] zadovoljila kriterijum, jer vrednost promene napona u tački priključenja, uz uticaj ostalih elektrana u delu mreže od interesa, ne prelazi 3% (kriterijum je zadovoljen i uz uticaj i bez uticaja opterećenja).

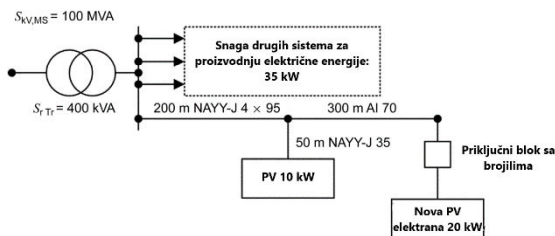
TABELA I. PROMENA NAPONA U TAČKI PRIKLJUČENJA SE SODERCE 5

Promena napona na mestu priključenja SE Soderce 5 bez uvažavanja opterećenja			
1. Pravila o radu distributivnog sistema [1]			
	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,95$ induktivno	$\cos \varphi = 0,95$ kapacitivno
Uticaj samo SE Soderce 5	0,169%	0,008%	0,328%
Uticaj svih 5 elektrana (SE Soderce 1–5)	0,845%	0,040%	1,640%
Uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže	0,859%	0,054%	1,654%
2. VDE standard [2], [3]			
Uticaj svih 5 elektrana (SE Soderce 1–5)	-0,350%, $\cos \varphi = 0,9$ induktivno		
Uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže	-0,336%, $\cos \varphi = 0,9$ induktivno		
Promena napona na mestu priključenja SE Soderce 5 uz uvažavanje opterećenja (prema [1])			
	<i>maksimalno opterećenje $\cos \varphi = 0,95$ kapacitivno</i>	<i>minimalno opterećenje $\cos \varphi = 1$</i>	
Uticaj samo SE Soderce 5	0,259%	0,131%	
Uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže	0,862%	0,734%	

B. Primer priključenja 20 kW PV elektrane na mrežu (primer iz VDE standarda [2])

Primer priključenja PV elektrane snage 20 kW, iz [2], takođe je analiziran prema relacijama koje su date u poglavlju II ovog rada (potpoglavlju A koji se odnosi na [1] i potpoglavlju B koji se odnosi na [2] i [3]).

Osim PV elektrane koja treba da se priključi na mrežu, u delu mreže od interesa, već postoji jedna PV elektrana snage 10 kW i drugi sistemi za proizvodnju električne energije ukupne snage 35 kW, kao što je prikazano na Sl. 4.



Slika 4. Priklučenje PV elektrane snage 20 kW na mrežu [2]

Prilikom proračuna promene napona, uz uvažavanje opterećenja mreže, uzeto je da je potrošnja, u čvoru u kom je

priključena PV elektrana snage 10 kW, jednaka 5 kW, dok je potrošnja, u čvoru u kome je priključena PV elektrana snage 20 kW, jednaka 15 kW, za maksimalno opterećenje. U slučaju minimalnog opterećenja, potrošnja u čvoru u kome je priključena PV elektrana snage 10 kW iznosi 2 kW, dok je potrošnja u čvoru u kome je priključena elektrana snage 20 kW jednaka 5 kW.

Ukoliko se proračuni izvrše prema [1], bez uvažavanja opterećenja mreže i uticaja ostalih elektrana koje se nalaze u delu mreže od interesa, najveća promena napona u tački priključenja nove PV elektrane se dobija u slučaju kada je $\cos \varphi = 0,95$ kapacitivno (prikazano u Tabeli II).

TABELA II. PROMENA NAPONA NA MESTU PRIKLJUČENJA NOVE ELEKTRANE SNAGE 20 kW

Promena napona na mestu priključenja PV elektrane snage 20 kW bez uvažavanja opterećenja			
1. Pravila o radu distributivnog sistema [1]			
	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,95$ induktivno	$\cos \varphi = 0,95$ kapacitivno
Uticaj samo PV elektrane snage 20 kW	2,50%	1,53%	3,47%
Uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže	3,05%	2,08%	4,02%
2. VDE standard [2], [3]			
Uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže	2,28%, $\cos \varphi = 0,9$ induktivno		
Promena napona na mestu priključenja PV elektrane snage 20 kW uz uvažavanje opterećenja (prema [1])			
	<i>maksimalno opterećenje $\cos \varphi = 0,95$ kapacitivno</i>	<i>minimalno opterećenje $\cos \varphi = 1$</i>	
Uticaj samo PV elektrane snage 20 kW	0,51%	1,38%	
Uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže	0,75%	1,62%	

Konstatuje se da prema [1] ovaj kriterijum ne bi bio zadovoljen, jer promena napona prevazilazi dozvoljenih 3%.

Proverom promene napona u tački priključenja nove PV elektrane, uz uvažavanje uticaja ostalih elektrana na promenu napona u posmatranoj tački, ali bez uticaja opterećenja u mreži, dobija se maksimalna vrednost od 4,02% (prikazano u Tabeli II), za $\cos \varphi = 0,95$ kapacitivno.

Dobijena vrednost ne prelazi dozvoljenih 5%, pa se može reći da je, posmatrano sa ovog aspekta, prema [1], kriterijum zadovoljen.

Prema [2], ukupna promena napona na mestu priključenja nove PV elektrane (uzimajući u obzir uticaj ostalih elektrana koje su priključene u delu mreže od interesa), pri $\cos \varphi = 0,9$ (u induktivnom režimu), iznosi 2,28%, kao što je prikazano u Tabeli II.

Može se zaključiti da je kriterijum maksimalno dozvoljene promene napona u tački priključenja zadovoljen, jer ne prelazi dozvoljenu vrednost od 3%, prema [2].

Kada su u pitanju proračuni promene napona, koji uvažavaju opterećenje u mreži, takođe su izvršeni primenom istih relacija, (3) i (4), kao i u prethodnom primeru.

Promena napona na mestu priključenja nove elektrane snage 20 kW, kada je samo ona u pogonu, iznosi 1,38% (manje od dozvoljenih 3%, prema [1]), uz minimalno opterećenje mreže. Ukoliko se pri istom opterećenju pusti u rad, osim nove PV elektrane, i već postojeća PV elektrana snage 10 kW, kao i ostale jedinice za proizvodnju električne energije, promena napona u tački priključenja nove PV elektrane iznosi 1,62% (što je manje od dozvoljenih 5%, prema [1] i manje od dozvoljenih 3%, prema [2]).

IV. ANALIZA REZULTATA

Analizom promene napona u stacionarnom stanju, za različite režime rada i opterećenje mreže se utvrđuje koji su rezultati merodavni, odnosno u kojim slučajevima se dobijaju najveće vrednosti, a u kojim slučajevima potencijalno realnije. Rezultati značajni za razmatranje u oba primera, prikazani su u Tabeli III.

TABELA III. REZULTATI PRORAČUNA

Rezultati proračuna za priključenje elektrane SE Soderce 5 i PV elektrane snage 20 kW prema proceduri iz Pravila o radu distributivnog sistema i prema proceduri iz VDE standarda		
Kriterijum iz poglavlja II	1. Pravila o radu distributivnog sistema [1]	2. VDE standard [2], [3]
SE SODERCE 5: Kriterijum maksimalnog odstupanja napona u tački priključenja u stacionarnom režimu, uzimajući u obzir samo elektranu koja se u toj tački priključuje	0,33% < 3% (bez opterećenja) 0,26% < 3% (sa opterećenjem)	ne proverava se u okviru procedure
SE SODERCE 5: Kriterijum maksimalnog odstupanja napona u tački priključenja, kao I u bilo kojoj drugoj tački EDS-a, u stacionarnom režimu, uzimajući u obzir sve elektrane priključene na razmatrani deo EDS	za kapacitivni režim 1,65% < 5% (bez opterećenja) 0,86% < 5% (sa opterećenjem)	za induktivni režim -0,34%
PV elektrana snage 20 kW: Kriterijum maksimalnog odstupanja napona u tački priključenja u stacionarnom režimu, uzimajući u obzir samo elektranu koja se u toj tački priključuje	3,47% > 3% (bez opterećenja) 1,38% < 3% (sa opterećenjem)	ne proverava se u okviru procedure
PV elektrana snage 20 kW: Kriterijum maksimalnog odstupanja napona u tački priključenja, kao I u bilo kojoj drugoj tački EDS-a, u stacionarnom režimu, uzimajući u obzir sve elektrane priključene na razmatrani deo EDS	za kapacitivni režim 4,02% < 5% (bez opterećenja) 1,62% < 5% (sa opterećenjem)	za induktivni režim 2,28%

Kriterijum maksimalno dozvoljene promene napona se, prema [1], proverava za tačku priključenja (promena napona treba da bude manja od 3%, uvažavajući uticaj samo elektrane koja se priključuje) i za bilo koju tačku u EDS-u, gde se zahteva da promena napona ne bude veća od 5%,

uvažavajući uticaj svih elektrana koje su priključene na deo mreže od interesa. Prema [2] i [3] se zahteva da promena napona u tački priključenja ne pređe maksimalnu vrednost od 3% za niski napon, odnosno 2% za srednji napon napajanja, uvažavajući uticaj svih elektrana u posmatranom delu mreže. Prema proceduri iz [1] se dobijaju veće vrednosti promene napona jer se proračuni rade za kapacitivni režim (kada PV elektrana injektira reaktivnu snagu u mrežu), dok se prema [2], proračuni vrše za induktivni režim rada (kada PV elektrana apsorbira reaktivnu snagu iz mreže). Ipak, mora se naglasiti da [1] zahteva i proračun tokova snaga, odnosno zahteva da se i opterećenje mreže uzme u obzir. Što je veće opterećenje mreže, odnosno, što je veća potrošnja, to će biti manji porast napona koji je posledica injektiranja aktivne snage PV elektrana u mrežu (drugim rečima, potrošnja u mreži će kompenzovati porast napona koji PV elektrane izazivaju). Rezultati dobijeni korišćenjem takvog pristupa su realniji u odnosu na slučaj kada se ne razmatra opterećenje, zato što je mreža u svakom trenutku, u manjoj ili većoj meri, opterećena. U nekim slučajevima se može dogoditi da apsolutna vrednost promene napona bude veća prema [2], kada se posmatra induktivni režim bez uzimanja opterećenja u obzir, nego kada se rade proračuni sa opterećenjem u mreži (i kada se uzima opterećenje u obzir, smatra se da su elektrane u kapacitivnom režimu rada, odnosno da injektiraju reaktivnu snagu u mrežu).

Ovaj kriterijum će u budućnosti biti još detaljnije analiziran na primeru veće mreže, sa realnijim modelom proizvodnje i potrošnje, kako bi se sa većom sigurnošću mogli potvrditi dosadašnji zaključci i dati konkretne preporuke za priključenje kupaca-proizvođača na mrežu.

V. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad je detaljno prikazan jedan od kriterijuma koje kupac-proizvođač treba da zadovolji, kako bi mogao da se priključi na elektrodistributivnu mrežu, a to je kriterijum promene napona u stacionarnom stanju. Za dva konkretna primera priključenja elektrane po modelu kupca-proizvođača, sprovedene su analize propisane kroz dokument „Pravila o radu distributivnog sistema“, sa jedne strane, kao i kroz nemački VDE standard, sa druge strane.

Dobijeni rezultati ukazuju da opterećenje u mreži značajno smanjuje porast napona koji je posledica injektiranja aktivne snage u mrežu od strane PV elektrana. Ukoliko neka PV elektrana ne zadovoljava kriterijum maksimalno dozvoljene promene napona u mreži bez uticaja opterećenja, treba uzeti u obzir i opterećenje, ponoviti proračune i uporediti rezultate. Ukoliko se dogodi da elektrana zadovolji kriterijum maksimalno dozvoljene promene napona prilikom proračuna koji uzimaju u obzir opterećenje (a nije zadovoljila prilikom proračuna bez opterećenja), trebalo bi da postoji mogućnost da se ona priključi na mrežu.

Navedeni zaključci i preporuke će biti utvrđeni u nastavku istraživanja na većim mrežama, sa realnijim modelima proizvodnje i potrošnje.

Rad prikazuje delove Poglavlja 6 Studije integracije kupaca-proizvođača u elektrodistributivni sistem Republike Srbije [6], koju je Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu izradio za potrebe korisnika EDS – Elektrodistribucija d.o.o. Beograd, naručioca GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, a koji je finansiralo nemačko Savezno ministarstvo za ekonomsku saradnju i razvoj. Objavljivanje ovog rada je finansijski podržalo i Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije pod brojem ugovora: 451-03-47/2023-01/200103.

LITERATURA

- [1] Pravila o radu distributivnog sistema “EPS Distribucija”, d.o.o. Beograd, jul 2017.
- [2] VDE-AR-N 4105:2018-11: Generators connected to the low-voltage distribution network – Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks
- [3] VDE-AR-N 4110:2018-11: Technical requirements and operation of customer installations to the medium voltage network (TCR medium voltage)
- [4] D. Zarev, M. Jevtić, M. Ječmenica, N. Hadžiefendić, J. Trifunović „Uperedna analiza kriterijuma za priključenje kupaca-proizvođača na elektrodistributivnu mrežu propisanih kroz domaću i stranu regulativu“, 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 20-22 March 2024, prihvaćen za objavljivanje
- [5] Анализа оптимальних услова прикључења објекта за производњу електричне енергије за соларну електрану „Содеце 5“, „ЕПС Дистрибуција“ д.о.о. Београд, јун 2023.
- [6] Studija integracije kupaca-proizvođača u distributivni sistem Republike Srbije, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2023.

ABSTRACT

The paper presents a detailed analysis of the criteria for permissible voltage changes in steady-state conditions, representing one of the requirements that the prosumer should satisfy to be connected to the distribution network. The requirements prescribed by the Distribution System Operator in the Republic of Serbia through the document „*Distribution Grid Code*“, on one side, as well as the requirements prescribed by the German VDE standard, on the other side, were analysed with regard to the maximum permissible voltage change. Their similarities and differences are discussed and the results of calculations carried out according to the stated criteria for the connection of typical prosumers to the distribution network are given. The aim of the conducted analysis is to derive conclusions that will be relevant for further research and have the potential to contribute to the improvement and simplification of the procedure for processing requests for the connection of prosumers to the distribution network.

**IMPACT OF LOADS ON STEADY-STATE
VOLTAGE CHANGES CAUSED BY CONNECTING
PROSUMERS TO THE POWER DISTRIBUTION
NETWORK**